

## تشخیص اشباع ترانسفورماتور جریان با استفاده از امپدانس لحظه‌ای شاخه مغناطیسی و روش FILT

علی‌رضا فلاحی<sup>۱</sup>، نبی‌الله رضائی<sup>۲\*</sup>، ایرج احمدی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۲۴	عدم تشخیص دقیق اشباع ترانسفورماتورهای جریان ممکن است باعث عملکرد نادرست سیستم‌های حفاظتی شود. باتوجه‌به مشخصه غیرخطی و تلفاتی هسته ترانسفورماتورهای جریان، به‌کارگیری روشی عددی به‌منظور تشخیص و جبران ورود نقطه کار جریان عبوری از آن به ناحیه اشباع امری ضروری است. بنابراین در این مقاله روشی جدید مبتنی بر محاسبه امپدانس شاخه مغناطیسی برای تشخیص اشباع و جبران ترانسفورماتور جریان ارائه شده است. در روش پیشنهادی با شاخه‌های مقاومتی غیرخطی و خطی، تلفات ترانسفورماتور جریان را مدل کرده، با محاسبه مقدار اندوکتانس لحظه‌ای هسته مغناطیسی با روش Jiles Atherton، امپدانس لحظه‌ای شاخه مغناطیسی با به‌کارگیری روش تبدیل لاپلاس معکوس عددی محاسبه می‌شود. برای تشخیص اشباع هسته ترانسفورماتور جریان مقدار امپدانس لحظه‌ای محاسبه‌شده در هر لحظه از زمان با یک مقدار آستانه مقایسه شده است. برای اطمینان از عملکرد روش پیشنهادی تأثیر عواملی از قبیل انواع خطاها، شار پسماند، زاویه شروع خطا، بارهای مختلف، مؤلفه DC در جریان اولیه موردارزیابی قرار گرفته است. همچنین روش ارائه‌شده توسط نرم‌افزارهای PSCAD-EMTDC و MATLAB پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی با داده‌های آزمایش مقایسه شده و در تمامی موارد، دقت، سرعت و قابلیت اطمینان زیاد آن به اثبات رسیده است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۵	
<b>واژگان کلیدی:</b> ترانسفورماتور جریان، اشباع هسته مغناطیسی، امپدانس لحظه‌ای، تبدیل لاپلاس معکوس.	

### ۱- مقدمه

چنین مشکلی به هنگام وقوع خطا باعث می‌شود مقدار مؤثر جریان عبوری از CT اشباع‌شده کمتر از حالت کار عادی خود شود. این مسئله می‌تواند سبب عملکرد نادرست رله‌های حفاظتی یا تأخیر در عملکرد رله‌ها و همچنین باعث عدم هماهنگی بین رله‌ها می‌شود.

تاکنون روش‌های متعددی برای تشخیص و جبران اشباع ترانسفورماتور جریان ارائه شده است. در مرجع [۱] محققین با استفاده از روش مشتق دوم قادر به تشخیص اشباع‌های کم شدند ولی این روش به نوبت بسیار حساس بوده، از سرعت عملکرد خوبی برخوردار نیست. روش پیشنهادی در مرجع [۲] بر اساس ترکیب دو روش مختلف

حفاظت در شبکه‌های قدرت یکی از مهم‌ترین مسائل چالش‌برانگیز در زمینه سیستم‌های قدرت به شمار می‌آید. ترانسفورماتور جریان یکی از اجزای تجهیزات حفاظتی است که وظیفه تبدیل جریان زیاد به جریان قابل‌اعمال به دیگر تجهیزات اندازه‌گیری و حفاظتی را برعهده دارد. عواملی همچون ساختمان هسته مغناطیسی، میزان دامنه جریان خطا، امپدانس تجهیزات حفاظتی نصب‌شده در ثانویه، شار پسماند و مؤلفه DC جریان و غیره در به اشباع رفتن هسته ترانسفورماتور جریان مؤثرند. زمانی که CT به اشباع می‌رود، جریان ثانویه عبوری از آن اعوجاجی می‌شود. بروز

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ramezani@mazust.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه

علم و فناوری مازندران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری مازندران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری

مازندران

بخش‌های غیراشباع تشخیص داده می‌شود. اما در این روش جریان شاخه مغناطیسی برحسب شار بر اساس معادله تقریبی تخمین زده می‌شود و علاوه بر آن، این روش به منحنی مغناطیسی نیاز دارد. همچنین بیشتر پارامترها از قبیل شار پسماند اولیه باید با روش رگرسیون تخمین زده شود که به علت تخمین‌های زیاد سرعت و دقت عملکرد روش ارائه شده کاهش می‌یابد. مرجع [۱۳] روشی مبتنی بر سیستم مرتبه اول و محاسبه شیب جریان ثانویه به منظور تشخیص اشباع ترانسفورماتور جریان ارائه می‌دهد. در این روش از مدلی خطی برای شاخه مغناطیسی ترانسفورماتور جریان بکار گرفته شده است که این مسئله از دقت مسئله می‌کاهد. مطابق مرجع [۱۴] تشخیص اشباع ترانسفورماتور جریان بر اساس الگوریتمی مبتنی بر تئوری موجک پیشنهاد شده است. مطابق روش پیشنهادی ارائه شده در این مرجع، برتری آن نسبت به روش‌های ارائه شده تاکنون از نظر دقت تشخیص اشباع کم و عمیق ترانسفورماتور جریان در شرایط مختلف بهره‌برداری دیده نشده است.

در این مقاله، با استفاده از مدل هیستریزیس Jiles Atherton، تمام پارامترهای هسته به صورت کاملاً دقیق محاسبه می‌شود. سپس مطابق اطلاعات و پارامترهای محاسبه شده هسته مقدار اندوکتانس لحظه‌ای قابل محاسبه است. پس از گنجاندن مقاومت‌های مدل‌کننده تلفات هسته مغناطیسی ترانسفورماتور جریان امپدانس معادل در حوزه لاپلاس محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از تبدیل لاپلاس معکوس سریع عددی (FILT) امپدانس معادل لحظه‌ای دیده شده از دو سر سیم‌پیچ ثانویه محاسبه می‌شود. نهایتاً اشباع ترانسفورماتور جریان با مقایسه امپدانس معادل و مقدار آستانه شروع و پایان اشباع هسته CT با دقت بسیار بالایی تشخیص داده می‌شود. از ویژگی‌های بارز این روش پیشنهادی، توانایی آن در تشخیص اشباع‌های خیلی عمیق و اشباع‌های جزئی است.

## ۲- تشریح مسئله

وقوع خطا در شبکه‌های قدرت، باعث افزایش دامنه جریان و در نتیجه، خروج منحنی شار- جریان هسته CT از ناحیه خطی و به اشباع رفتن هسته ترانسفورماتور جریان و اعوجاجی شدن جریان ثانویه می‌شود. تغییر شکل موج جریان سبب تغییر در جریان مؤثر و در نهایت منجر به

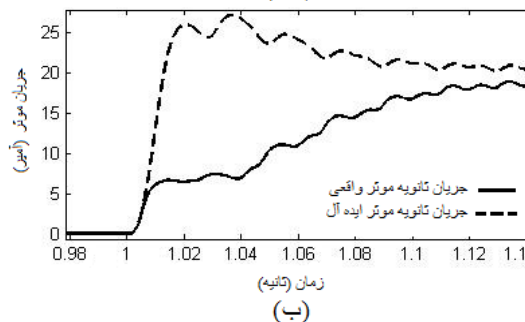
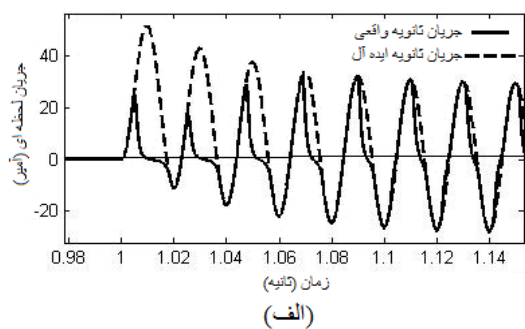
برای تشخیص اشباع ترانسفورماتور جریان بنا شده است. روش نخست، مبتنی بر این حقیقت است که جریان ثانویه در لحظه اشباع دچار تغییرات قابل توجهی می‌شود. بر اساس این ویژگی، روشی که در آن مشتق دوم جریان خروجی ترانسفورماتور به کار گرفته شده، توسعه داده شده است. همچنین روش دوم پیشنهادی توسط مرجع فوق از معیار عبور از صفر جریان به منظور تشخیص اشباع ترانسفورماتور جریان استفاده کرده است. این روش در مواردی همچون وجود نویز، اشباع کم، تغییر فرکانس و جریان‌های با مؤلفه DC بالا دچار مشکل می‌شود. مطابق مرجع [۳] طول دوره اشباع با استفاده از روش توابع تفاضلی تشخیص داده می‌شود. این روش قادر به تشخیص اشباع‌های خیلی عمیق نیست. پژوهشگران در مرجع [۴] با استفاده از فازور جریان توانستند شروع اشباع را با تأخیر تشخیص دهند. همچنین مطابق مرجع [۵]، تشخیص دوره اشباع با استفاده از روش امپدانس مجازی امکان‌پذیر است ولی در این روش منحنی B-H کاملاً خطی در نظر گرفته شده، همچنین برای اشباع‌های کم عملکرد مطلوبی ندارد. در مراجع [۶-۷] مدل ترانسفورماتور جریان بر اساس مدل هیستریزیس Jiles Atherton در نرم‌افزار EMTP/ATP شبیه‌سازی شده است. در روش دیجیتالی [۸] با استفاده از ترکیب روش تبدیل موجک و روش رگرسیون توانستند باتوجه به بخش‌های غیراشباع استخراج شده طول دوره اشباع را تشخیص داده، جبران کنند. از آنجاکه در این روش از تبدیل موجک استفاده نشده، قادر به جبران هر نوع اشباعی نیست. در روش جبران مبتنی بر شبکه عصبی ارائه شده در مرجع [۹] از یک تابع معکوس برای جبران جریان ثانویه CT اشباع شده استفاده شده است. به هر حال در این روش از سه فاکتور اصلی اشباع (مؤلفه DC، ثابت زمانی و شار پسماند) فقط مؤلفه DC در نظر گرفته شده است. در روش جبران دیجیتالی [۱۰-۱۱] ابتدا شار پسماند محاسبه شده، سپس با داشتن منحنی هیستریزیس جریان تحریک محاسبه می‌شود. این روش تنها برای اشباع‌های کم قابل قبول بوده، اساس روش با فرض چشم‌پوشی از شار پسماند اولیه هسته بوده است. در مرجع [۱۱] از یک مدل غیرخطی جزئی برای نشان دادن مشخصات اشباع غیرخطی استفاده شده است. همچنین با استفاده از رگرسیون، بخش‌های اشباع از

<sup>1</sup> Fast Inverse Laplace Transform

عملکرد نادرست رله‌های حفاظتی شبکه می‌شود.

## ۱-۲- تأثیر اشباع بر عملکرد رله‌ها

شکل (۱)-الف جریان ثانویه یک CT ایدئال را همراه جریان ثانویه یک CT واقعی نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، جریان خطا باعث به اشباع رفتن هسته CT شده، در نتیجه جریان ثانویه اعوجاجی شده است. همچنین شکل (۱)-ب مقدار مؤثر جریان ثانویه CT ایدئال را همراه مقدار مؤثر جریان ثانویه یک CT واقعی در هنگام خطا نشان می‌دهد. مطابق شکل مقدار مؤثر جریان در یک CT واقعی که هسته آن دچار اشباع و جریان ثانویه آن اعوجاجی شده است، دارای تأخیر و همچنین افت دامنه است. بعضی از تجهیزات حفاظتی همچون رله‌های جریان زیاد بر اساس مقدار مؤثر جریان ثانویه CT عمل می‌کنند که این تأخیر و افت دامنه باعث عملکرد نامناسب و تأخیر در عملکرد رله حفاظتی خواهد شد.



شکل ۱: شکل موج جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان (الف) جریان لحظه‌ای (ب) جریان مؤثر

## ۲-۲- روابط تحلیلی حاکم بر مسئله

این بخش از دو قسمت اصلی تشکیل شده است که در بخش اول با استفاده از روابط ریاضی مدل هیستریزیس Jiles Atherton مقدار مغناطیس [۶] و با استفاده از روابط ریاضی حاکم بر ترانسفورماتور جریان مقدار اندوکتانس لحظه‌ای هسته ترانسفورماتور جریان محاسبه شده است. سپس در بخش دوم امیدانس معادل از دید ثانویه

ترانسفورماتور جریان محاسبه شده است.

## ۲-۱- محاسبه اندوکتانس لحظه‌ای

مدار معادل یک ترانسفورماتور جریان واقعی مطابق شکل (۲) ارائه شده که برای نشان دادن روابط غیرخطی حاکم بر هسته آن از مدل Jiles Atherton استفاده شده است.  $i_L$  جریان ثانویه و  $R$  مقاومت بار ثانویه (امپدانس رله حفاظتی)،  $R_a$  مقاومت غیرخطی هسته مغناطیسی (مدل‌کننده تلفات هیستریزیس)،  $R_e$  مقاومت مدل‌کننده تلفات گردابی و  $i_{m2}$  جریان شاخه مغناطیسی است و به‌طور کلی بر اساس روابط مدل Jiles Atherton مدل‌سازی می‌شود. باتوجه به شکل (۲) و روابط اساسی CT داریم:

$$i_2(t) = \frac{i_1(t)}{N} \quad (1)$$

که در آن  $i_1$  جریان اولیه،  $i_2$  جریان ثانویه CT و  $N$  تعداد دور ثانویه (با فرض ترانسفورماتور جریان میله‌ای) آن است. تلفات جریان گردابی و مقاومت غیرخطی هسته طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$p_e(t) = k_e \left( \frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dAl \quad (2)$$

$$p_a(t) = k_a \left( \frac{dB(t)}{dt} \right)^{3/2} dAl \quad (3)$$

که  $k_e$  ثابت تلفات جریان گردابی،  $k_a$  ثابت تلفات غیرخطی،  $d$  چگالی مواد مغناطیسی،  $A$  سطح مقطع هسته،  $l$  طول متوسط هسته و  $B$  چگالی شار مغناطیسی است که به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{dB(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{NA} \quad (4)$$

با جای‌گذاری رابطه (۴) در رابطه (۲)، رابطه تلفات جریان گردابی به‌ترتیب زیر به دست می‌آید:

$$p_e(t) = k_e \left( \frac{v_L^2(t)}{N^2 A} \right) dl \quad (5)$$

در نتیجه مقاومت شاخه تلفات گردابی طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$R_e = \frac{v_L^2(t)}{p_e(t)} = \frac{N^2 A}{k_e dl} \quad (6)$$

همچنین باتوجه به روابط (۳) و (۴) مقاومت وابسته به ولتاژ

شدت میدان مغناطیسی مطابق با قانون مداری آمپر برای یک CT با طول متوسط  $l$  به ترتیب زیر به دست می‌آید:

$$H = \frac{Ni_{m2}}{l} \quad (14)$$

با جای‌گذاری رابطه (۱۴) در (۱۳) رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$v_2(t) = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} \cdot \left(1 + \frac{dM}{dH}\right) \cdot \frac{di_{m2}}{dt} \quad (15)$$

با استفاده از رابطه (۱۵) و رابطه (۹) مشتق جریان شاخه مغناطیسی نسبت به زمان حاصل می‌شود:

$$\frac{di_{m2}}{dt} = \frac{l}{\mu_0 N^2 A} \cdot \frac{1}{1 + \frac{dM}{dH}} \cdot Ri_L \quad (16)$$

همچنین مقدار جریان شاخه مغناطیسی در حالت گسسته برابر است با:

$$\frac{i_{m2}(j+1) - i_{m2}(j)}{\Delta t} = \frac{l}{\mu_0 N^2 A} \cdot \frac{1}{1 + \frac{dM}{dH}} \cdot Ri_L(j) \quad (17)$$

از طرفی ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور جریان با رابطه زیر قابل محاسبه است:

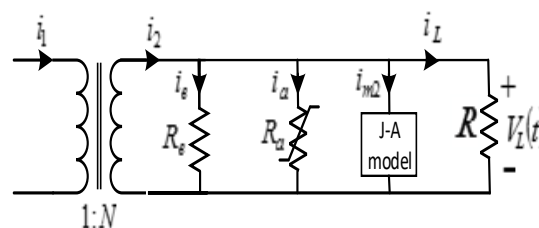
$$v_2(t) = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)،  $L(t) = \frac{d\lambda}{di_m}$  است و با مقایسه این رابطه و رابطه (۱۵) اندوکتانس متغیر با زمان مطابق رابطه (۱۹) حاصل می‌شود.

$$L(t) = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} \times \left( 1 + (1-c)\delta \frac{M_{an} - M}{\text{sign}(H) \cdot k(1-c) - \alpha(M_{an} - M)} + c \frac{dM_{an}}{dH} \right) \quad (19)$$

مراحل محاسبه پارامترهای روش پیشنهادی با استفاده از جریان ثانویه و روش بازگشتی در شکل (۳) آورده شده است.

ثانویه شاخه هیستریزس مطابق با رابطه (۷) محاسبه می‌شود.



شکل ۲: مدار معادل ترانسفورماتور جریان

$$R_a = \frac{v_L^2(t)}{p_a(t)} = \frac{v_L^{1/2} N^{3/2} A^{1/2}}{k_a dl} \quad (7)$$

همچنین رابطه بین جریان ثانویه ( $i_2$ )، جریان مغناطیس‌کنندگی ( $i_{m2}$ )، جریان بار ثانویه ( $i_L$ )، جریان شاخه غیرخطی هسته مغناطیسی ( $i_a$ ) و مقاومت جریان گردابی مطابق با رابطه (۸) است.

$$i_2(t) = i_{m2}(t) + i_L(t) + i_e(t) + i_a(t) \quad (8)$$

ولتاژ دو سر بار ثانویه را می‌توان با توجه به شکل (۲) و رابطه اهم، این‌گونه نوشت:

$$v_L(t) = i_L(t) * R \quad (9)$$

ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور جریان را مطابق قانون فارادی می‌توان به ترتیب زیر نوشت:

$$v_L(t) = N \frac{d\phi}{dt} = \mu_0 NA \frac{d(H+M)}{dt} \quad (10)$$

که  $M$  مغناطیس کل است و  $\frac{dM}{dt}$  را می‌توان این‌گونه بیان کرد:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dM}{dH} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (11)$$

همچنین مقدار  $\frac{dM}{dt}$  مطابق با مرجع [۱۲] برابر است با:

$$\frac{dM}{dH} = (1-c)\delta \cdot \frac{M_{an} - M}{\text{sign}(H) \cdot k(1-c) - \alpha(M_{an} - M)} + c \frac{dM_{an}}{dH} \quad (12)$$

با جای‌گذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۱۰) داریم:

$$v_2(t) = \mu_0 NA \cdot \left(1 + \frac{dM}{dH}\right) \frac{dH}{dt} \quad (13)$$

لاپلاس معکوس سریع عددی [۱۲] استفاده شده که در ادامه آمده است. مقدار امپدانس شاخه مغناطیسی متشکل از سه المان موازی با هم است، که در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$Z_T = R_a \parallel R_e \parallel (S L_m) \quad (20)$$

در رابطه فوق  $R_a$  و  $L_m$  از روابط بازگشتی (۷) و (۱۹) محاسبه می‌شوند.

به‌طور کلی برای تبدیل هر تابع  $F(s)$  به حوزه زمان می‌توان از رابطه (۲۱) استفاده کرد.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma-j\infty}^{\gamma+j\infty} F(s) \exp(st) ds \quad (21)$$

مقادیر لحظه‌ای تابع  $F(s)$  با تابع گسسته زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{ec}^{lm}(t) = (e^a/t) \left[ \sum_{n=1}^{l-1} F_n + 2^{-m-1} \sum_{n=0}^m A_{mm} F_{l+n} \right] \quad (22)$$

که در رابطه فوق  $F_n$  و  $A_{mm}$  این‌گونه تعریف می‌شوند.

$$F_n = (-1)^n \text{Im} F \{ [a + j(n-0.5)\pi]/t \} \quad (23)$$

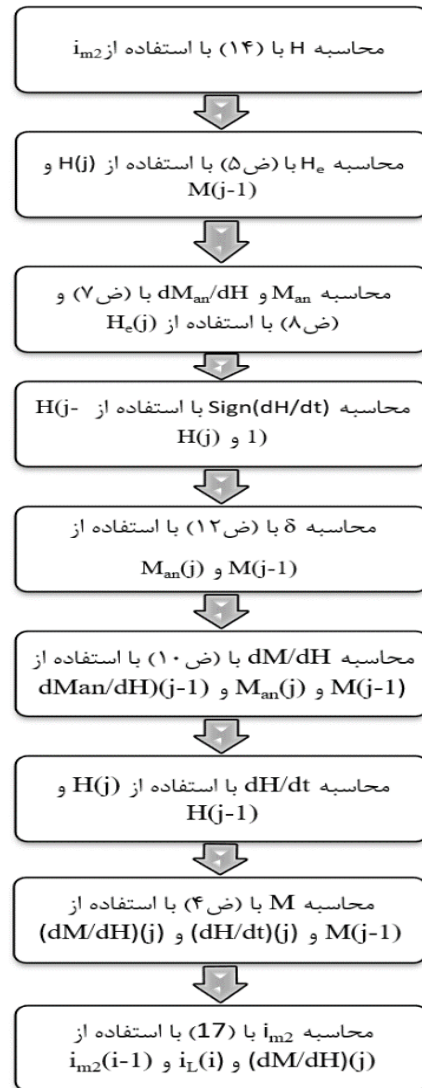
$$A_{mm} = 1, \quad A_{mm-1} = A_{mm} + \binom{m+1}{n} \quad (24)$$

نخستین اقدام برای محاسبه  $f(t)$ ، انتخاب مناسب  $a$ ،  $m$  و  $l$  در رابطه (۲۲) است. مقادیر این پارامترها برای مسائل غیرخطی مختلف، متفاوت است. این پارامترها با در دست داشتن اطلاعات یک مسئله واقعی نمونه و اجرای الگوریتم برای آن و رسیدن به حداقل خطای ممکن تعیین می‌شوند. در این مقاله با بررسی‌های به‌عمل آمده برای تعیین و تشخیص اشباع ترانسفورماتور جریان با انتخاب  $a=2$  و  $m=10$  و  $l=15$  بهترین پاسخ با حداقل خطای ممکن به دست می‌آید.

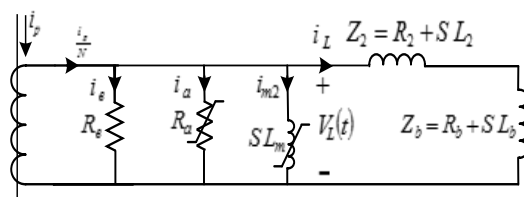
### ۲-۲-۲-۳- محاسبه امپدانس آستانه

برای محاسبه امپدانس آستانه کافی است مقدار امپدانس مغناطیسی هسته را به‌زای اندوکتانس نقطه زانو (اندوکتانس آستانه) محاسبه کرد. بنابراین با توجه به رابطه (۱۹) اندوکتانس آستانه که همان اندوکتانس لحظه‌ای به‌زای جریان نقطه زانو است، محاسبه می‌شود

$$L_{Th} = L(t) \Big|_{i=i_{knee}} \quad (25)$$



شکل ۳: مراحل محاسبه پارامترهای هسته با روش بازگشتی

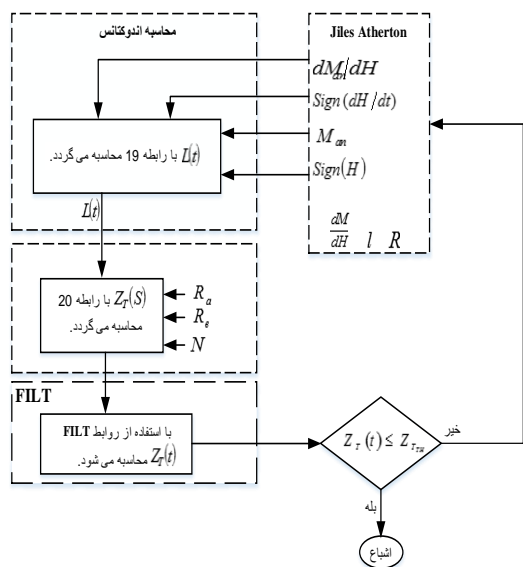


شکل ۴: مدار معادل ترانسفورماتور جریان در حوزه S

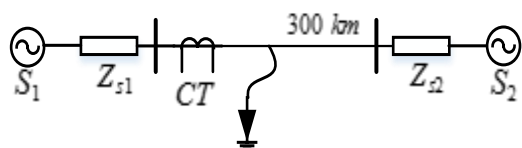
### ۲-۲-۲-۴- محاسبه امپدانس معادل شاخه مغناطیسی

در شکل (۴) مدار معادل ترانسفورماتور جریان در حوزه S نشان داده شده است. به‌علت غیرخطی بودن شاخه مغناطیسی، امپدانس معادل شاخه مغناطیسی در حوزه لاپلاس غیرخطی بوده و با استفاده از روابط بازگشتی در هر لحظه از زمان قابل محاسبه است. بنابراین با روش‌های معمولی نمی‌توان امپدانس معادل لحظه‌ای شاخه مغناطیسی را محاسبه کرد. بدین‌منظور از روش تبدیل

شده است. پس از محاسبه امپدانس در حوزه فرکانس باید امپدانس در حوزه زمان با استفاده از FILT محاسبه شود. در بخش تشخیص اشباع در هر لحظه مقدار امپدانس لحظه‌ای با مقدار امپدانس آستانه (مطابق بند ۲-۲-۳) محاسبه شده، اگر مقدار امپدانس لحظه‌ای کوچک‌تر از مقدار امپدانس نقطه زانو باشد، الگوریتم شروع و پایان طول دوره اشباع را تشخیص می‌دهد.



شکل ۶: فلوجارت روش پیشنهادی



شکل ۷: مدل نمونه سیستم قدرت

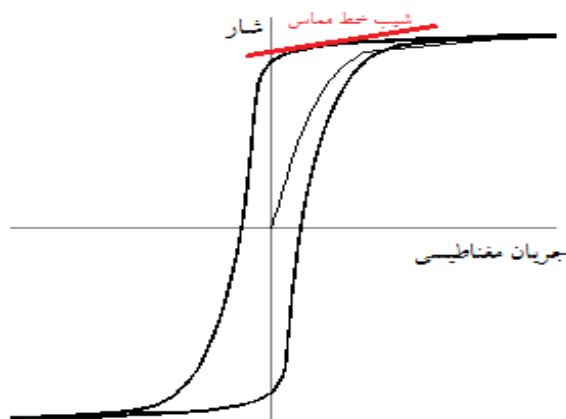
### ۴- اجرای روش برای شبکه نمونه و ارائه نتایج

یک مدل سیستم قدرت مطابق با شکل (۷) ارائه شده است. [۱۱] این مدل از دو منبع ولتاژ یکسان  $S_1$  و  $S_2$  تشکیل شده که دارای ولتاژ خط  $240KV$  و زاویه فازهای مختلف است.  $Z_{S1}$  و  $Z_{S2}$  امپدانس معادل منابع  $S_1$  و  $S_2$  و طول خط انتقال  $300km$  است. همچنین برای اطمینان از درستی عملکرد این الگوریتم، مقادیر مختلفی از شار پسماند، انواع خطاها، زاویه شروع خطا، انواع بار ثانویه CT بردن، وجود مؤلفه DC در جریان خطا مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه روش پیشنهادی با مرجع [۱۱]، بخش اندوکتانس لحظه‌ای مطابق رابطه (۱۹) در روش پیشنهادی به منظور محاسبه جریان ثانویه جبران‌شده اجرا شده و خطاهای روش

بنابراین مقدار امپدانس مغناطیسی آستانه در رابطه (۲۰) با  $L_{Th}$  محاسبه شده به دست می‌آید.

### ۳- تشریح الگوریتم تشخیص اشباع

در شکل (۵) منحنی هیستریزیس یک CT نشان داده شده است. خط قرمز رنگ موجود در شکل، همان شیب خط مماس بر منحنی است. باتوجه به معادله (۱۹) و شکل (۳)، شیب خط مماس بر منحنی هیستریزیس همان اندوکتانس لحظه‌ای است. زمانی که هسته CT وارد ناحیه اشباع می‌شود، شیب خط مماس در این ناحیه به صفر نزدیک شده، که در واقع اندوکتانس لحظه‌ای به صفر نزدیک می‌شود. بنابراین باتوجه به کاهش اندوکتانس،  $Z_{\sigma}$  هم به همان نسبت کاهش می‌یابد. در اشباع‌های عمیق که اندوکتانس به صفر می‌رسد، مقدار  $Z_{\sigma}$  هم به صفر نزدیک می‌شود. در واقع چون بعد از نقطه زانویی است که اشباع رخ می‌دهد، ابتدا باید اندوکتانس لحظه‌ای را به‌ازای نقطه زانو محاسبه کرد و سپس مقدار امپدانس آستانه محاسبه شود. در نهایت الگوریتم به‌این ترتیب عمل می‌کند که در هر لحظه امپدانس لحظه‌ای با مقدار امپدانس نقطه زانو محاسبه می‌شود و اگر مقدار امپدانس لحظه‌ای از مقدار امپدانس نقطه زانو کم‌تر باشد، در واقع هسته ترانسفورماتور جریان وارد ناحیه اشباع شده است. برای محاسبه مقدار اندوکتانس آستانه، باید اندوکتانس لحظه‌ای را به‌ازای جریان نقطه زانو محاسبه کرد (معادله (۲۶)).



شکل ۵: منحنی هیستریزیس یک CT

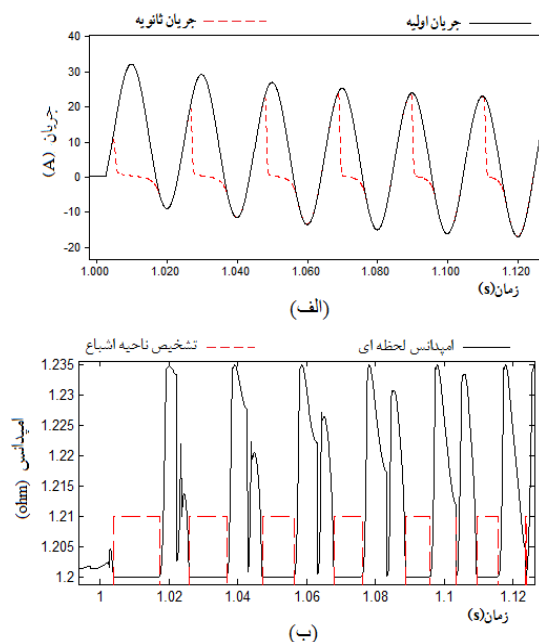
الگوریتم روش پیشنهادی در شکل (۶) ارائه شده، همچنین در این روش فلوجارت بخش J-A در مرجع [۱۱] آمده است. پس از محاسبه مقادیر بخش J-A، اندوکتانس لحظه‌ای با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. برای محاسبه امپدانس در حوزه فرکانس از رابطه (۲۰) استفاده

در شکل (۸) -ب مقدار امپدانس لحظه‌ای هسته CT و طول ناحیه اشباع (منحنی محصور در مستطیل قرمز رنگ) تشخیص داده شده توسط این الگوریتم نشان داده شده است. مقدار خطای ایجاد شده در جریان ثانویه جبران شده با روش اندوکتانس لحظه‌ای برای این نمونه از آزمایش در مرجع [۱۱]، ۱.۳۶٪ است، در حالی که با استفاده از روش پیشنهادی، تنها در شروع و پایان دوره اشباع خطا وجود دارد و مقدار آن هم بسیار ناچیز و در حدود ۰.۰۷٪ است.

#### ۴-۲- نمونه ۲: طرح شارپسماند سنگین

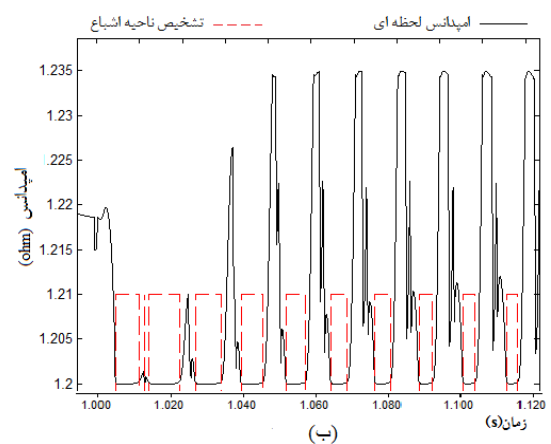
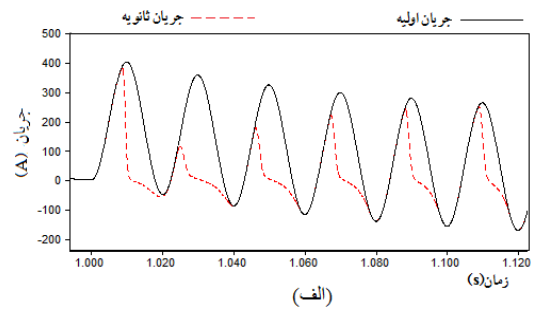
شار پسماند سنگین تأثیر زیادی در به اشباع رفتن CT در نیم سیکل اول خطا دارد. شکل (۹) نتایج حاصل از شبیه سازی روش پیشنهادی در نمونه دوم است. شکل (۹) -الف به ترتیب شامل جریان اولیه و جریان ثانویه نشان داده شده توسط روش پیشنهادی است. همان طور که مشخص است در این نمونه به علت شار پسماند اولیه در نیم سیکل اول هسته CT دچار اشباع عمیق شده، جریان ثانویه اعوجاجی می شود. در شکل (۹) -ب مقدار امپدانس لحظه‌ای و ناحیه اشباع، نشان داده شده است.

همچنین برای جریان ثانویه جبران شده با روش اندوکتانس لحظه‌ای، ماکزیمم مقدار خطا در نمونه تست ۲ ارائه شده در مرجع [۱۱]، ۱.۹۸٪ بوده، در حالی که با روش پیشنهادی ۰.۷۸٪ است که حکایت از دقت بسیار بالای این الگوریتم در تشخیص و جبران جریان ثانویه دارد.

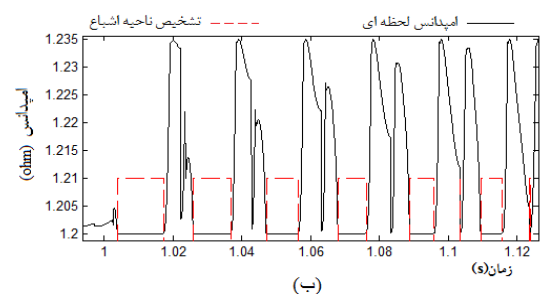
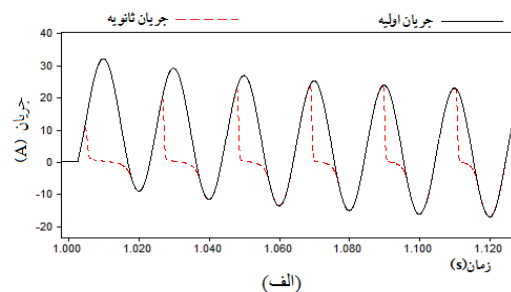


شکل ۱۰: نتایج حاصل از نمونه ۳ (الف) جریان‌های اولیه و ثانویه (ب) امپدانس لحظه‌ای و تشخیص ناحیه اشباع

ارائه گردیده در مقاله با مرجع، در نمونه‌های مورد آزمایش، ارزیابی شده است.



شکل ۸: نتایج حاصل از نمونه ۱ (الف) جریان‌های اولیه و ثانویه (ب) امپدانس لحظه‌ای و تشخیص ناحیه اشباع



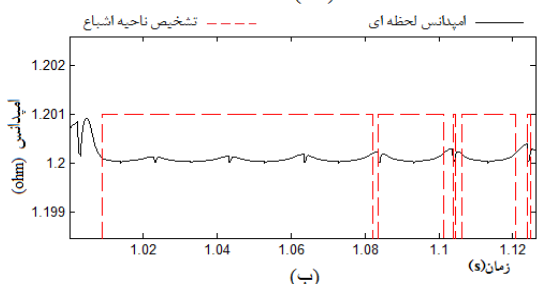
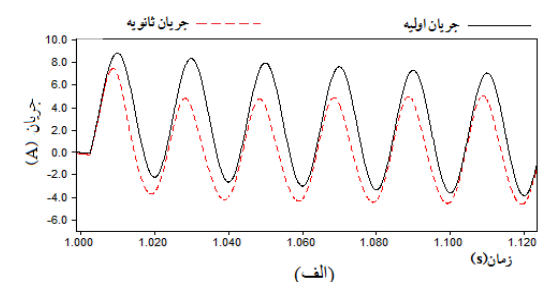
شکل ۹: نتایج حاصل از نمونه ۲ (الف) جریان‌های اولیه و ثانویه (ب) امپدانس لحظه‌ای و تشخیص ناحیه اشباع

#### ۴-۱- نمونه ۱: بررسی اشباع نرمال

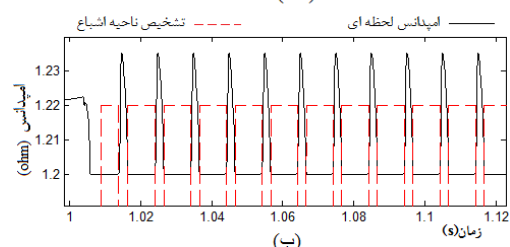
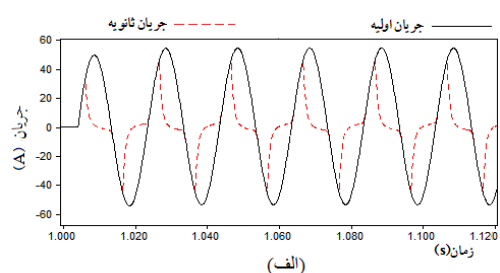
شکل (۸) نتیجه حاصل از شبیه سازی بررسی اشباع نرمال با روش پیشنهادی است. شکل (۸) -الف به ترتیب جریان اولیه و جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان را نشان می دهد.

جدول ۱: اطلاعات نمونه‌های آزمایش شده

نمونه‌های متعدد آزمایش	ضریب $X/R$	شار پسماند	زاویه شروع خطا	محل خطا	مقاومت خطا	بار ثانویه
نمونه ۱	۳۰	٪۰	۰°	۸۰ km	۰٫۱Ω	۲۵Ω
نمونه ۲	۴۰	٪۸۰	۴۵°	۱۰۰ km	۰٫۱Ω	۲۵Ω
نمونه ۳	۲۰	٪۰	۱۸۰°	۸۰ km	۲Ω	۳۰ Ω · ۰٫۵pf
نمونه ۴	۶۰	٪۸۰	۴۵°	۱۰ km	۰٫۱Ω	۱٫۵Ω
نمونه ۵	۲۰	۰٪	۹۰°	۳۰ km	۰٫۱Ω	۵۰Ω



شکل ۱۱: نتایج حاصل از نمونه ۴ (الف) جریان‌های اولیه و ثانویه (ب) امپدانس لحظه‌ای و تشخیص ناحیه اشباع



شکل ۱۲: نتایج حاصل از شبیه‌سازی نمونه ۵ (الف) جریان‌های اولیه و ثانویه (ب) امپدانس لحظه‌ای و تشخیص ناحیه اشباع

#### ۳-۴-۳: نمونه ۳: بار CT با ضریب قدرت $0.5 pF$

بار CT متشکل از امپدانس سمت ثانویه مدار معادل آن و امپدانس رله متصل به آن و حتی امپدانس سیم‌های رابط بین رله و CT است. شکل (۱۰) نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی را در نمونه سوم نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۱۰) هرچه مقدار امپدانس بار ثانویه بیشتر باشد، اشباع عمیق‌تر خواهد بود. همچنین هرچه ضریب قدرت بیشتر باشد، تغییرات شکل موج در هنگام اشباع نرم و صاف‌تر خواهد بود. در شکل (۱۰) الف به ترتیب جریان اولیه و جریان ثانویه به دست آمده توسط این الگوریتم نشان داده شده است.

مطابق اطلاعات و شرایط موجود در این تست، مقدار خطا در مرجع [۱۱]،  $0.43\%$  بوده، درحالی‌که مقدار خطا با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله کمتر از  $0.071\%$  است.

#### ۴-۴-۴: نمونه ۴: طرح شار پسماند زیاد و بردن کم CT

در شرایط شار پسماند سنگین با بار ثانویه کم که اغلب در حفاظت رله‌های دیجیتال اتفاق می‌افتد، موج جریان ثانویه بسیار به شکل موج سینوسی نزدیک است. شکل (۱۱) نتایج حاصل از شبیه‌سازی نمونه چهارم با روش پیشنهادی است. گفتنی است مقدار خطا در این حالت در مرجع [۱۱]،  $3.92\%$  بوده، درحالی‌که مقدار خطا در همین طرح با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله  $0.87\%$  است. بنابراین با وجود شار پسماند سنگین و بار ثانویه کم، روش پیشنهادی در این مقاله توانسته است ناحیه اشباع را به درستی تشخیص دهد.



که  $M_{irr}$  مغناطیس تغییرناپذیر و  $M_{an}$  مغناطیس غیرهیستریزیس است و  $sign(x)$  نیز این گونه تعریف می شود:

$$sign(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (\text{ض } 2)$$

همچنین مشتق مغناطیس برگشت پذیر  $M_{rev}$  برابر است با:

$$\frac{dM_{rev}}{dH} = C \left[ \frac{dM_{an}}{dH} - \frac{dM}{dH} \right] \quad (\text{ض } 3)$$

که  $M$  مغناطیس کل و  $C$  ضریب تناسب است که یکی از پارامترهای J-A است. در نتیجه مغناطیس کل به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$M = M_{irr} + M_{rev} \quad (\text{ض } 4)$$

همچنین  $H_e$  میدان مغناطیسی مؤثر بوده، مطابق با رابطه (ض ۵) قابل محاسبه است.

$$H_e = H + \alpha M \quad (\text{ض } 5)$$

$\alpha$  ضریب کوپلینگ (یکی از پارامترهای J-A) است. همچنین چگالی شار ( $B$ ) برابر است با:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (\text{ض } 6)$$

از رابطه (ض ۷) برای محاسبه مغناطیس غیرهیستریزیس استفاده می شود.

$$M_{an} = M_s \left( \coth \frac{He}{a} - \frac{a}{He} \right) \quad (\text{ض } 7)$$

مشتق مغناطیس غیرهیستریزیس برابر است با:

$$\frac{\partial M_{an}}{\partial H} = \frac{M_s}{a} \left[ 1 - \coth^2 \frac{He}{a} + \left( \frac{a}{He} \right)^2 \right] \quad (\text{ض } 8)$$

که  $M_s$  گشتاور مغناطیسی اشباع و  $a$  پارامتر شکلی (هر دو از پارامترهای J-A) است. همچنین مغناطیس برگشت پذیر را می توان این گونه نوشت:

$$M_{rev} = C (M_{an} - M) \quad (\text{ض } 9)$$

همچنین مشتق مغناطیس کل بر حسب شدت میدان مطابق با رابطه (ض ۱۰) است.

$$\frac{dM}{dH} = \frac{1}{1+C} \cdot \frac{M_{an} - M_{irr}}{sign(H) \cdot k - \alpha (M_{an} - M_{irr})}$$

#### ۴-۵- نمونه ۵: طرح اشباع AC

اشباع AC از طریق بار زیاد CT یا جریان خطا متقارن ایجاد می شود که هر دو نیم سیکل مثبت و منفی وارد ناحیه اشباع می شوند. در شکل (۱۲) نتایج حاصل از شبیه سازی نمونه ۵ با استفاده از روش پیشنهادی نشان داده شده است. در این حالت مقدار خطای جریان ثانویه جبران شده در مرجع [۱۱]، ۰.۲٪ بوده، در حالی که مقدار خطای روش پیشنهادی در این نمونه از آزمایش ۰.۰۵۷٪ است که حکایت از دقت و سرعت بالای این روش دارد.

#### ۵- نتیجه گیری

در بعضی موارد دامنه جریان خطا باعث به اشباع رفتن هسته CT های حفاظتی می شود. روش ارائه شده در این مقاله بر پایه محاسبات مدل هیستریزیس است. در این روش با استفاده از مدل هیستریزیس Jiles Atherton و روش بازگشتی مقدار پارامترهای لحظه ای، همچون اندوکتانس لحظه ای و جریان مغناطیس کننده هسته ترانسفورماتور جریان از طریق جریان ثانویه CT محاسبه می شود. سپس با به کارگیری اندوکتانس لحظه ای و مدل های مقاومتی تلفات هسته مغناطیسی امپدانس لحظه ای با روش FILT محاسبه می شود. سپس با محاسبه اندوکتانس نقطه زانو و به تبع آن امپدانس آستانه طول دوره اشباع برای مقایسه با امپدانس لحظه ای مدار مغناطیسی محاسبه می شود. برای اطمینان از عملکرد روش پیشنهادی تأثیر عوامل مؤثر در به اشباع رفتن ترانسفورماتورهای جریان از قبیل انواع خطاها، شار پسماند، زاویه شروع خطا، بارهای ثانویه مختلف، مؤلفه DC جریان اولیه مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل از این روش در مقایسه با مرجع، حاکی از دقت با خطای کمتر از ۱ درصد در تمامی حالات، سرعت بسیار بالا و نیز قابلیت اطمینان بالای روش پیشنهادی است.

#### ۶- ضمیمه

با استفاده از مرجع [۱۰] می توان پارامترهای مدل J-A را این گونه بیان کرد.

مشتق مغناطیس تغییرناپذیر ( $M_{irr}$ ) به شدت میدان مغناطیسی برابر است با:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an}(H_e) - M_{irr}}{K \cdot sign\left(\frac{dH}{dt}\right) - \alpha [M_{an}(H_e) - M_{irr}]} \quad (\text{ض } 1)$$

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{\text{sign}(H).k(1-c) - \alpha(M_{an} - M)} + \frac{C}{1+C} \frac{dM_{an}}{dH} \quad (\text{ض } 10)$$

$$(1-c)\delta + c \frac{dM_{an}}{dH} \quad (\text{ض } 11)$$

که  $\delta$  در رابطه (ض ۱۱) این گونه بیان می‌شود:

$$\delta = \begin{cases} 0, & \text{if } \text{sign}(H). \alpha(M_{an} - M) \leq 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{ض } 12)$$

را به صورت  $M_{an} - M_{irr}$  می‌توان

بیان کرد. ( $k$  به تلفات هیستریزس مربوط است) با استفاده

از رابطه  $M_{rev} = C(M_{an} - M_{irr})$  می‌توان رابطه

(ض ۱۰) را چنین بیان کرد:

## ۶- مراجع

- [1]. Y. C. Kang, S. H. Ok, and S. H. Kang, "A CT Saturation Detection Algorithm", IEEE Trans. Power Del., Vol. 19, No. 1, Jan.2004, pp. 78–85.
- [2]. Dashti, H., Sanaye-Pasand M., Davarpanah, M, "Fast and Reliable CT Saturation Detection Using a Combined Method", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 24, No. 4, Oct. 2013, pp. 2254-2263.
- [3]. E. M. dos Santos, G. Cardoso, Jr., P. E. Farias, and A. P. de Morais, "CT Saturation Detection Based on the Distance Between Consecutive Points in the Plans Formed by the Secondary Current Samples and Their Difference-Functions", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 28, No. 1, Jan 2013, pp. 29 – 37.
- [4]. Dong-Gyu Lee, Sung-Rok Yoo and Sang-Hee Kang, "A Phasor Estimation Algorithm during CT Saturation", IEEE Conference PowerTech, Jun. 2011, pp. 19-23.
- [5]. Shun-Tsai Liu, Sy-Ruen Huang, Hung-Wei Chen, Ting-Yen Hsien, "Current Transformer Module Basing the Jiles-Atherton Hysteresis Model in EMTP/ATP Simulation", International Power Engineering Conference (IPEC), 2005, pp. 653 - 656.
- [6]. Shun-Tsai Liu, Sy-Ruen Huang, Hung-Wei Chen, "Using TACS Functions Within EMTP to Set Up Current-Transformer Model Based on the Jiles–Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, Oct. 2007, pp. 2222 – 2227.
- [7]. Y. C. Kang, J. K. Park, S. H. Kang, A. T. Johns, and R. K. Aggarwal, "An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers", IEEE Trans. Power Del., Vol. 12, No. 1, Jan.1997, pp. 116–124.
- [8]. Y. C. Kang, S. H. Ok, and S. H. Kang, "A CT Saturation Detection Algorithm", IEEE Trans. Power Del., Vol. 19, No. 1, Jan.2004, pp. 78–85.
- [9]. Y. C. Kang, S. H. Ok, S. H. Kang, and P. A. Crossley, "Design and Evaluation of an Algorithm for Detecting Current Transformer Saturation", Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib, Vol. 151, No. 1, Jan. 2004, pp. 27–35.
- [10]. C. Fernandez, "An Impedance-Based CT Saturation Detection Algorithm for Busbar Differential Protection", IEEE Trans. Power Del., Vol. 16, No.4, Oct. 2001, pp. 468–472,.
- [11]. D.Y. Shi, J. Buse, Q.H. Wub, C.X. Guo, "Current Transformer Saturation Compensation Based on a Partial Nonlinear Model", Electric Power Systems Research, Vol. 97, Apr. 2013, pp. 34-40.
- [12]. T. Hosono, "Numerical inversion of Laplace Transform and Some Applications to Wave Optics", Radio sci., Vol. 16, No. 6, Nov. 1981, pp. 1015-1019.
- [13]. N. G. Chothani, Vimal Sharma, "A New Method for CT Saturation Detection using Secondary Current Envelope Detector", International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), 2015, pp. 1-6.
- [14]. Sang-Hee Kang, Min-Soo Kim, Soon-Ryul Nam, Jonathan H. Shin†, Jong-Jin Jung, "A CT Saturation Detection Algorithm Based on Wavelet Transformation", 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), pp. 1-4.